

DE LA CONCEPTION À LA PRODUCTION,
IMPORTANCE
DE L'INDUSTRIALISATION
DANS L'HORLOGERIE



Analyse, synthèse et création d'échappements horlogers par la théorie des engrenages

Olivier Lässer¹, Simon Henein

Laboratoire de conception micromécanique et horlogère, EPFL-STI-IMT Instant-Lab

Résumé

Nous présentons la *méthode du tracé primitif* développée par le premier auteur dans sa thèse de doctorat. Cette nouvelle méthode donne pour la première fois une approche systématique à la problématique du tracé d'un échappement horloger. Elle revient à considérer chacune des phases cinématiques d'un échappement comme une transmission par engrenages. Puisque les engrenages sont décrits par leurs cercles primitifs, il s'ensuit que le fonctionnement d'un échappement peut être décrit par l'ensemble des arcs de cercles primitifs de ses différentes phases que nous appelons *tracé primitif* de l'échappement. L'étude des échappements au travers de leur *tracé primitif* a plusieurs implications : le tracé d'un échappement devient systématique grâce à cette formalisation du concept de tracé ; inversement, des échappements peuvent être facilement dessinés en partant d'un *tracé primitif* donné. C'est ainsi qu'un nouvel échappement dit « à double impulsion primitive » a été inventé. Cet échappement a été construit et ses performances sont prometteuses.

Introduction

L'échappement horloger présente des défis particuliers pour qui est suffisamment téméraire pour se lancer dans la quête du Graal horloger : l'échappement parfait. Premièrement, c'est le premier système de contrôle de l'histoire [1], et tel qu'Hercule contre l'Hydre, chaque solution apportée pour remédier à un défaut en génère d'autres collatéraux.

Une deuxième difficulté est la nature généralement absconse des principes de *tracé* des échappements : les tracés que l'on trouve dans les livres [4, pages 222-223, 252], sont un amalgame de lignes et d'arcs de cercles que l'on suppose avoir un sens pour l'auteur, mais qui sont quasiment impossibles à comprendre ou à reconstruire.

L'objet de cet article est de présenter une solution complète à la problématique du tracé, donnée pour la première fois dans la thèse du premier auteur [7]. La méthode du *tracé primitif* permet de dessiner facilement le tracé d'un échappement existant ainsi que de dessiner de nouveaux échappements sur la base d'un *tracé primitif*.

Ainsi que décrit dans la thèse, la méthode du *tracé primitif* permet d'établir des similarités auparavant insoupçonnées entre des échappements qui sont a priori différents. Elle est donc un premier pas vers une classification formelle de nombreux échappements horlogers.

¹ L'auteur remercie Vaucher Manufacture Fleurier pour le soutien apporté à sa thèse de doctorat, ainsi que pour le financement du projet de l'échappement à double impulsion primitive.

Panorama des échappements

Ce panorama présente vingt-neuf échappements de référence décrits chronologiquement et selon leurs caractéristiques principales. Ce panorama fait office d'état de l'art des échappements horlogers. Les détails sont disponibles dans les références.

L'échappement vu comme un engrenage

Le concept de base des engrenages est que la transmission de couple idéalisée par deux cylindres roulant l'un contre l'autre sans glisser peut être réalisée par deux engrenages dotés de dents aux profils conjugués. La cinématique d'un engrenage à rapport de transmission constant est donc décrite par deux cercles tangents intérieurement ou extérieurement roulant l'un sur l'autre sans glisser (Fig. 1). De la même manière, si l'on considère que durant chacune des phases de fonctionnement d'un échappement le rapport de transmission reste constant, alors sa cinématique peut être décrite par des arcs de cercles roulant successivement intérieurement ou extérieurement les uns contre les autres sans glisser. Les cercles équivalents à un engrenage sont appelés *cercles primitifs*. De la même manière nous appellerons *tracé primitif* le tracé des arcs de cercles reproduisant la cinématique des échappements (Fig. 2).

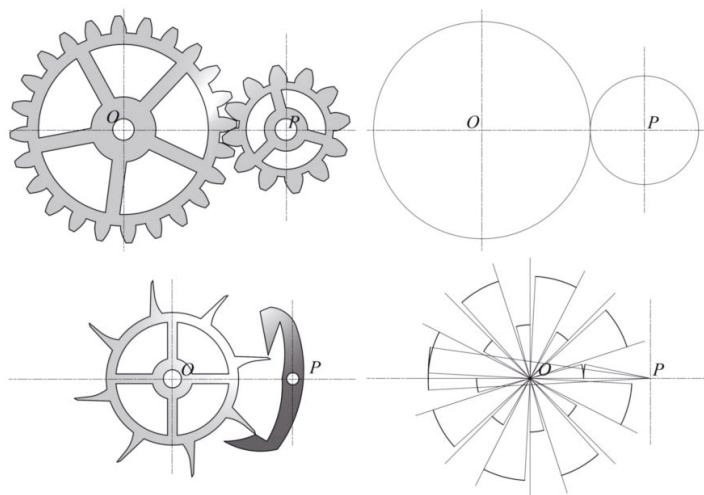


Fig. 1: En haut: engrenages et cercles primitifs équivalents. En bas: roue d'échappement contre ancre et arcs de cercles formant le *tracé primitif* équivalent.

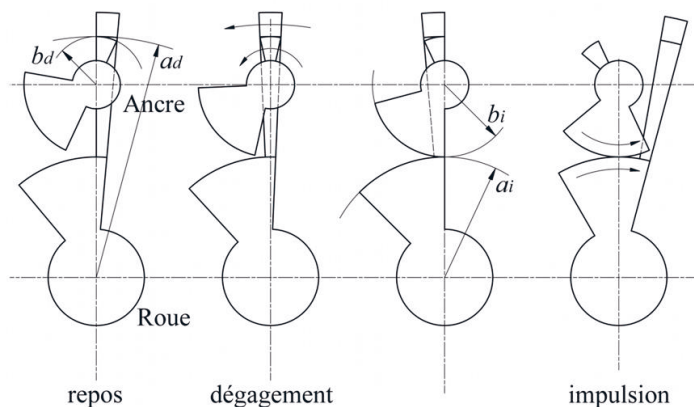
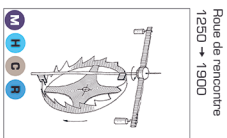
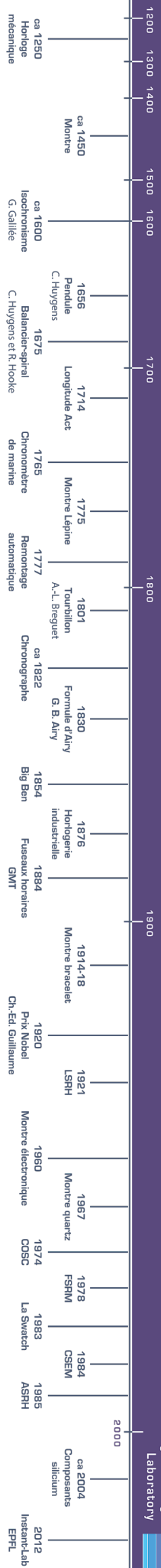
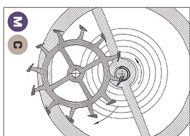


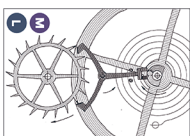
Fig. 2: Exemple de *tracé primitif*: fonction de sortie complète d'une ancre avec tirage.



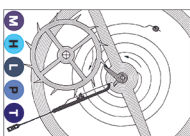
Roue de rencontre
1250 → 1900



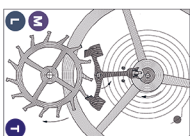
Duplex
P. LeRoy, 1750



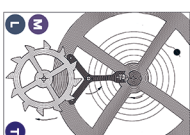
Verge
J.-A. Lépine, 1756



Robb
R. Robb, 1791



Naturel
A.-L. Breguet, 1808



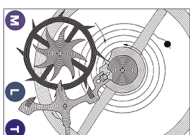
Malley Frères
R. & F. Malley, 1825



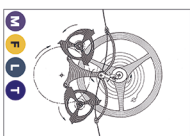
Ingold
P. F. Ingold, ca 1840



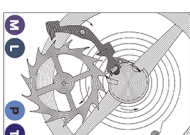
Potter
A. H. Potter, 1887



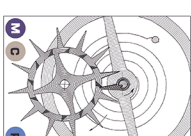
Coxall
G. Daniels, 1980 → présent



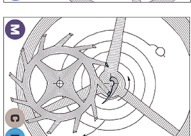
Échappement Constant
N. Déron, 1989 → présent



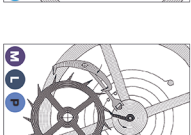
Audemars Piguet
P. Audureau, 2001 → présent



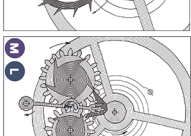
Ancre à repos
G. Graham, 1720 → présent



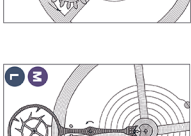
Grasshopper
J. Harrison, 1720



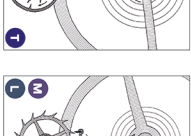
Robb
R. Robb, 1791



Naturel
A.-L. Breguet, 1808



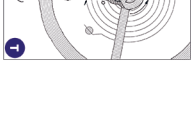
Malley Frères
R. & F. Malley, 1825



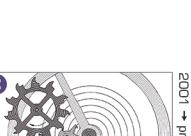
Ingold
P. F. Ingold, ca 1840



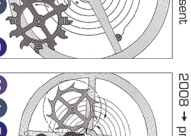
Potter
A. H. Potter, 1887



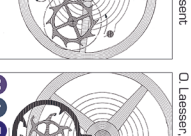
Coxall
G. Daniels, 1980 → présent



Échappement Constant
N. Déron, 1989 → présent



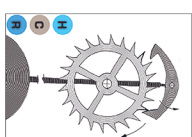
Audemars Piguet
P. Audureau, 2001 → présent



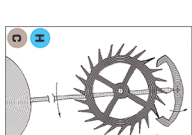
Double impulsion
O. Laessen, 2014



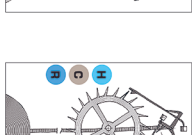
Système Genequand
P. Genequand, 2014



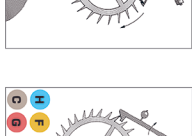
Ancre à recul
R. Hooke, 1657 → présent



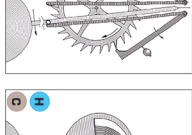
Ancre à repos
G. Graham, 1720 → présent



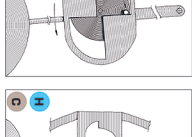
Grasshopper
J. Harrison, 1720



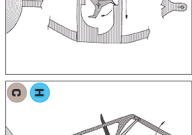
Robb
R. Robb, 1791



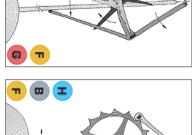
Naturel
A.-L. Breguet, 1808



Malley Frères
R. & F. Malley, 1825



Ingold
P. F. Ingold, ca 1840



Potter
A. H. Potter, 1887



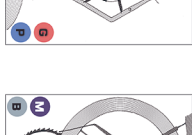
Coxall
G. Daniels, 1980 → présent



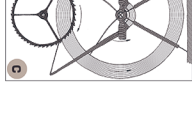
Échappement Constant
N. Déron, 1989 → présent



Audemars Piguet
P. Audureau, 2001 → présent



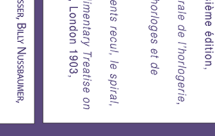
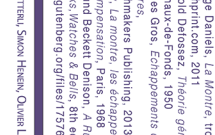
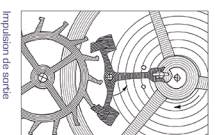
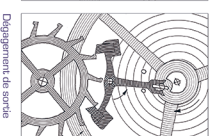
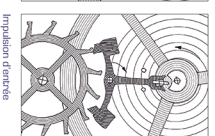
Double impulsion
O. Laessen, 2014



Système Genequand
P. Genequand, 2014

- Légende**
- M Montre
 - H Horloge
 - B EXCITATION PAR LA BASE
 - C CONTACT PERMANENT
 - F FORCE CONSTANTE
 - G GRAVITÉ
 - L LIÈGE
 - P COUP REÇU
 - R REÇU
 - T TRAPÈZE

- Concepts**
- Isocronisme**
La fréquence de l'oscillateur est indépendante de son amplitude. L'isocronisme est la base de l'horogène de précision.
 - Échappement libre**
L'oscillateur n'est en contact avec l'échappement que pendant le dévissage et l'impulsion, ce qui réduit la perturbation de la fréquence de l'oscillateur.
 - Échappement à contact permanent**
Le contact permanent est toujours en contact avec une pièce de l'échappement. Le contact permanent est très nuisible à la précision des montres.
 - Échappement à force constante**
L'échappement transmet à l'oscillateur, à chaque impulsion, une énergie égale. L'oscillateur travaille à amplitude constante.
 - Trappe**
Innové par R. Pendleton aux environs de 1800, il sécrète le fonctionnement de l'échappement par l'introduction d'un angle aux repos des palettes.



- Auteurs**
- Berner en ligne, Fédération horlogère suisse, www.fhs.ch/berner
 - Paul M. Chamberlain, It's About Time, The Holland Press, 1984
 - Georges Daniels, La Montre, troisième édition, Watchprint.com, 2011
 - Leopold Deleessaz, Théorie générale de l'horlogerie, La Chaix-de-Fonds, 1950
 - Charles Gros, Échappements d'horloges et de chronomètres, Paris, 1903
 - Edmund Beckett Denison, A Rudimentary Treatise on Clocks, Watches & Bells, 8th ed., London 1903, www.gutenberg.org/files/17576
 - Roland Bittel, Simon Henck, Olivier Lasser, Burt Nussbaum, Ivan Vaki
 - Illustrations: Olivier Lasser
 - Grafième: Bicomix Toix

Exemple du *tracé primitif* de l'échappement à ancre

La cinématique de l'échappement à ancre se résume en deux phases d'impulsion durant lesquelles la roue d'échappement tourne toujours dans le même sens, tandis que l'ancre tourne alternativement dans un sens, puis dans l'autre. Un tel mouvement peut être traduit par deux arcs convexes roulant l'un contre l'autre, puis par un arc convexe roulant sur un arc concave. La géométrie de l'échappement à ancre définit entièrement les parcours angulaires de la roue et de l'ancre qui, à leur tour, définissent entièrement les rayons et angles des arcs primitifs. En ajoutant les phases intermédiaires bien connues de dégagements et de chutes et en mettant le tout dans le bon ordre, on obtient de manière univoque le *tracé primitif* de l'échappement à ancre à repos de Graham (Fig. 3 et 4).

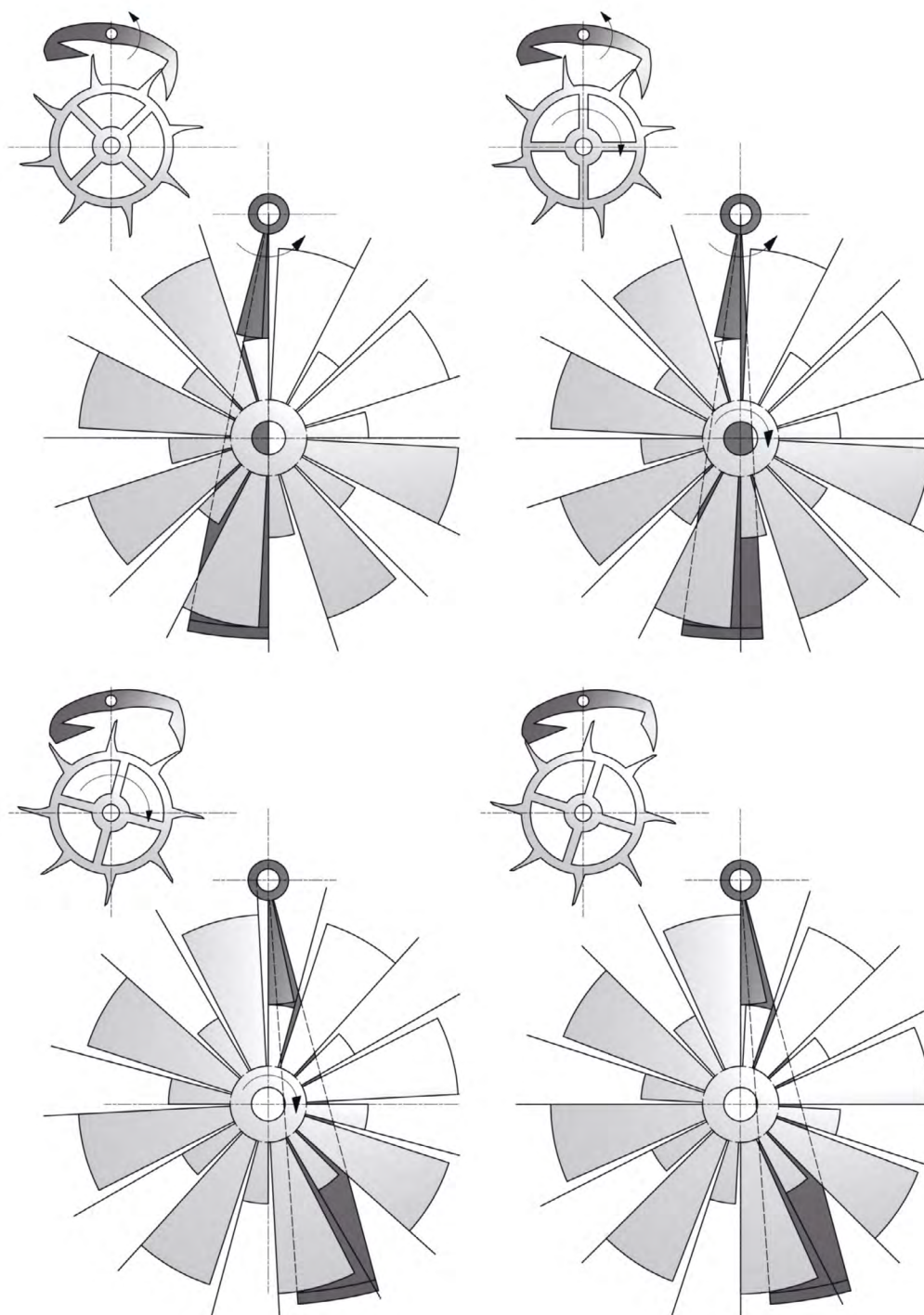


Fig. 3: L'échappement à ancre de Graham et son *tracé primitif* équivalent: visualisation séquentielle de la fonction de sortie de l'échappement: début du dégagement; début de l'impulsion; début de la chute et repos d'entrée.

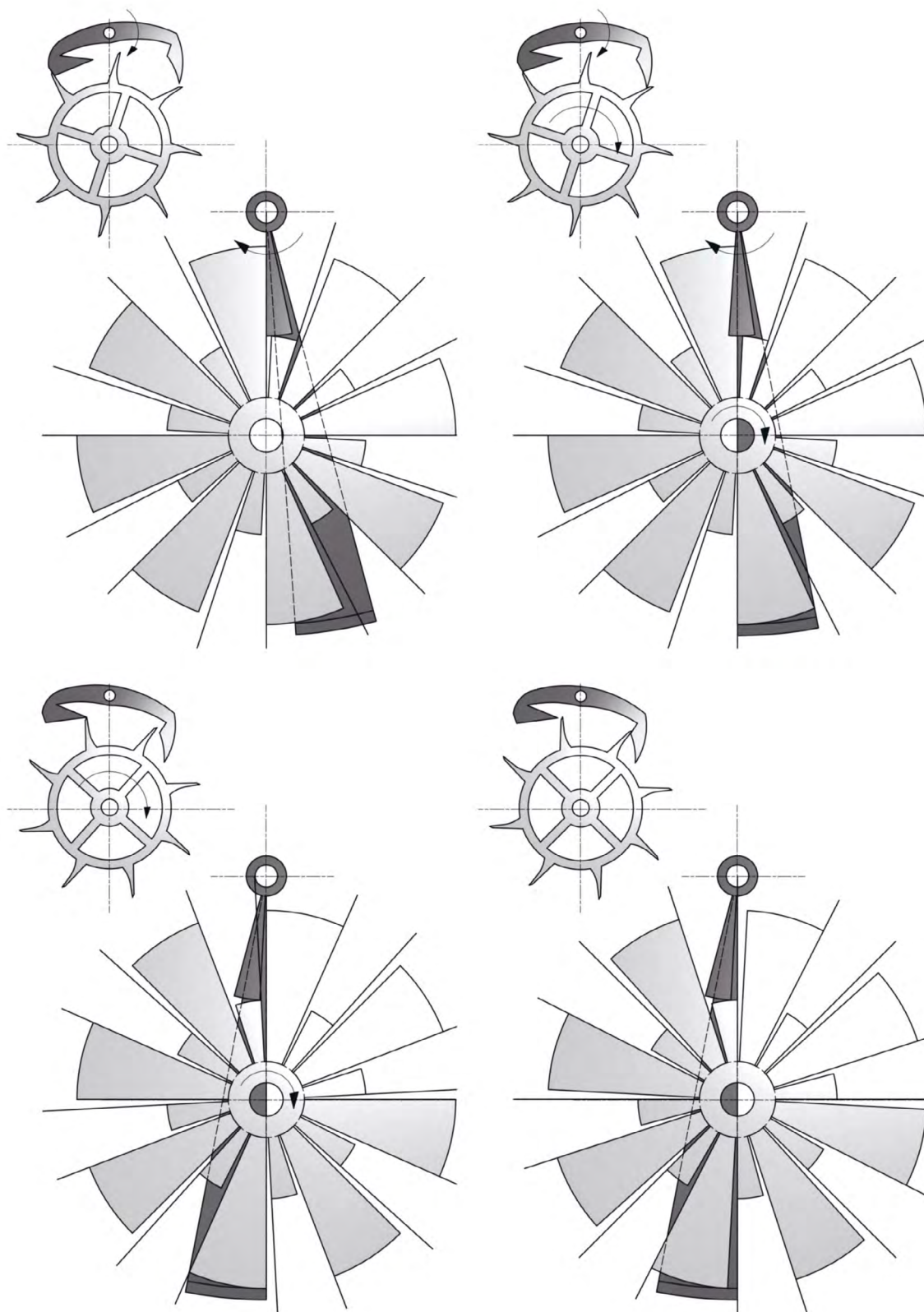


Fig. 4: L'échappement à ancre de Graham et son *tracé primitif* équivalent: visualisation séquentielle de la fonction d'entrée de l'échappement: début du dégagement; début de l'impulsion; début de la chute et repos de sortie.

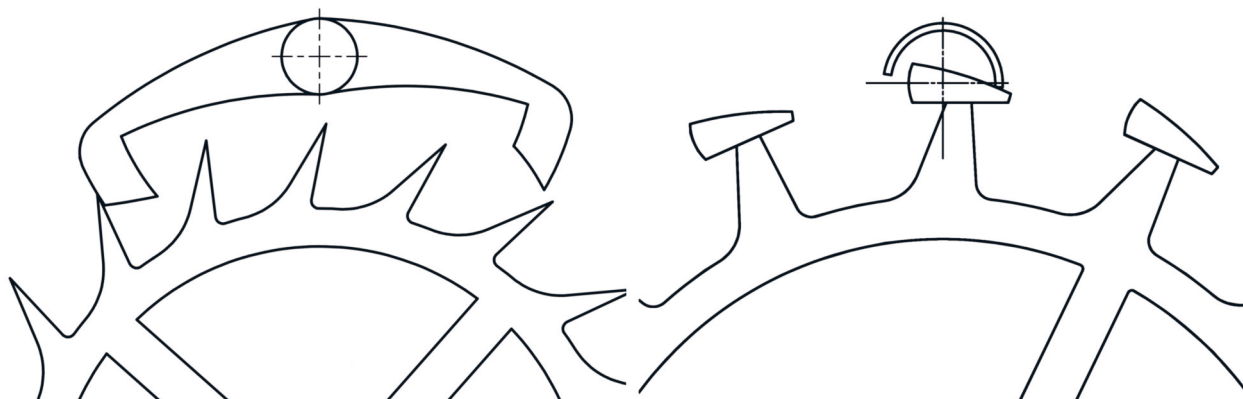


Fig. 5: Echappements à ancre de Graham et à cylindre dotés du même *tracé primitif*.

Exemple de regroupement d'échappements sur la base de leur *tracé primitif*

De l'échappement à ancre découle un unique *tracé primitif*. En revanche, d'un *tracé primitif* peuvent découler plusieurs géométries d'échappement différentes. Ceci ouvre la voie vers de nouveaux regroupements [7, chapitre 3].

A titre d'exemple, l'échappement à cylindre et l'échappement à ancre de Graham (Fig. 5) dont les géométries sont différentes ont le même *tracé primitif* (Fig. 3 et 4). Dans les deux cas, durant les deux phases d'impulsion, la roue d'échappement tourne dans le même sens alors que le cylindre tourne dans un sens puis dans l'autre. Les repos et les chutes sont disposés de la même manière.

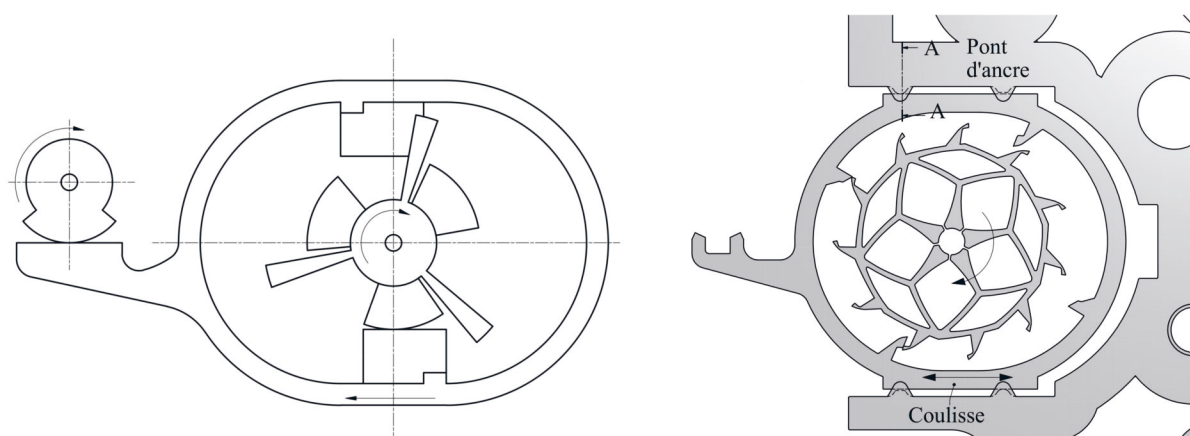


Fig. 6: *Tracé primitif* du Melly Frères fiabilisé (ici une version simplifiée à 3 dents) et échappement à double impulsion primitive.

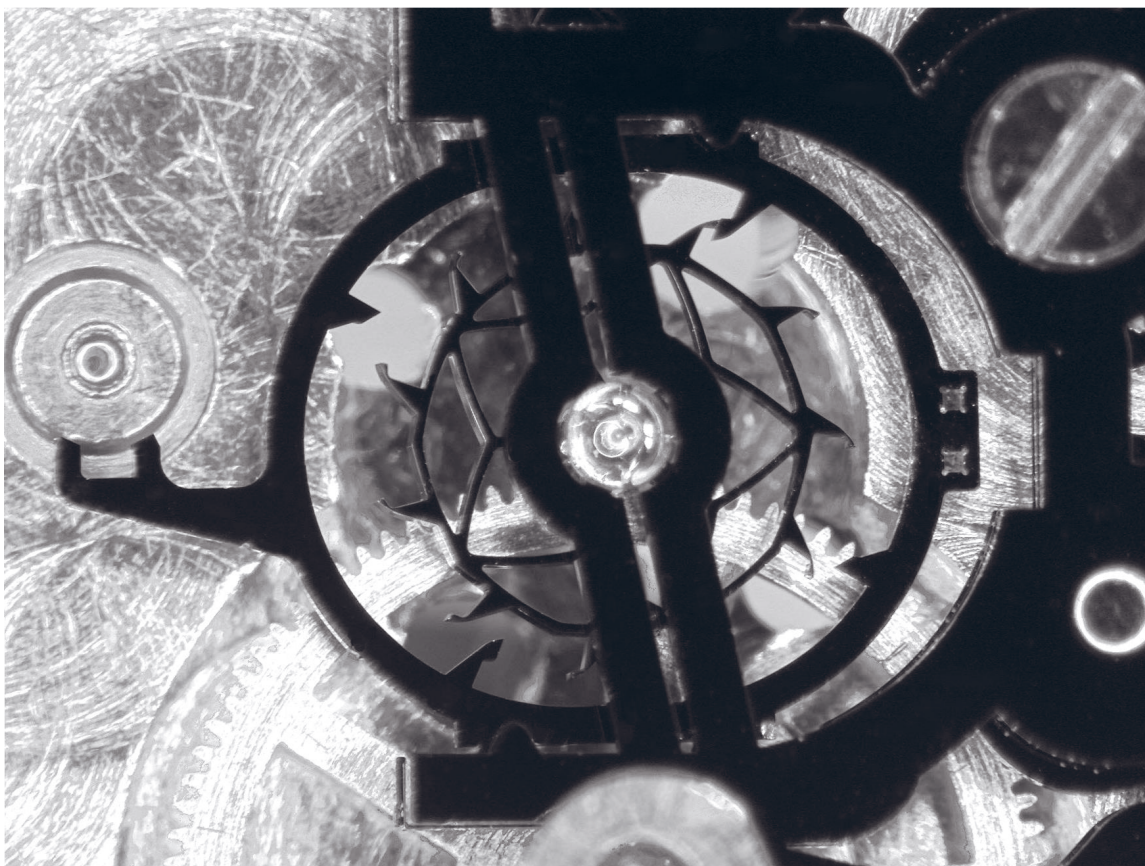


Fig. 7 : Réalisation de l'échappement à double impulsion primitive : ancre et roue d'échappement en silicium.

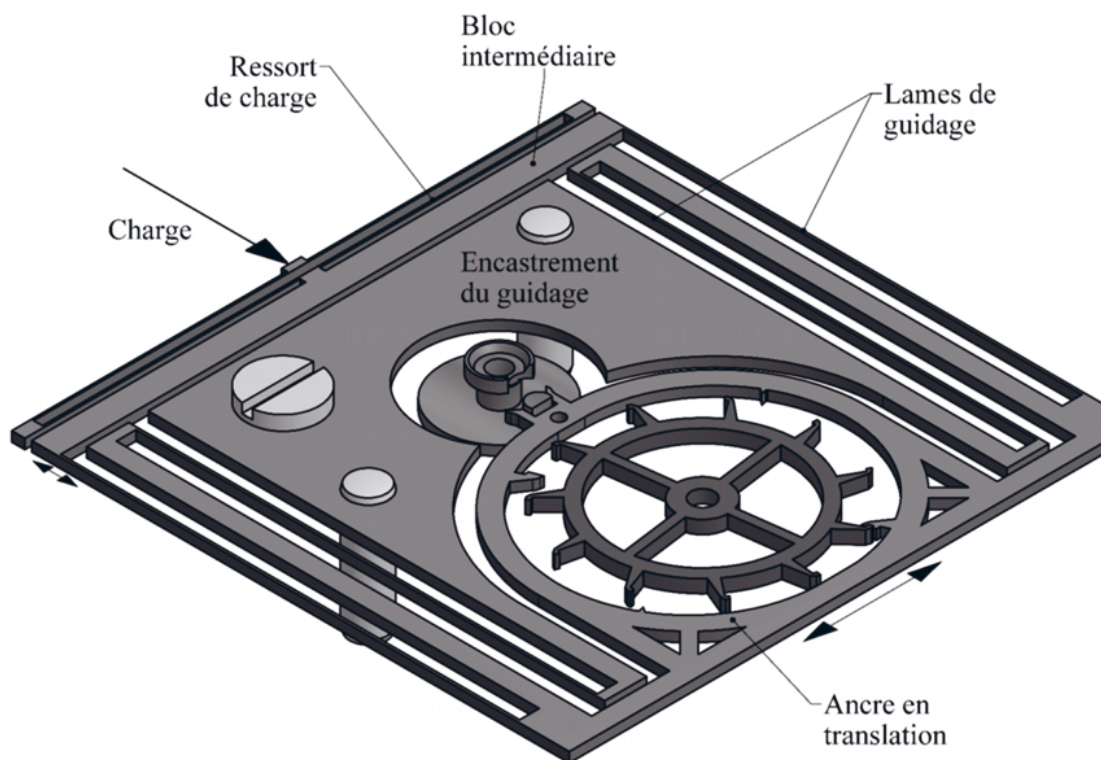


Fig. 8 : Vue CAD de l'échappement à double impulsion primitive avec suspension en translation basée sur un guidage flexible à rigidité compensée.

Conception de l'échappement à double impulsion primitive

La vue d'ensemble offerte par les *tracés primitifs* associée à des considérations énergétiques traitées dans [7, chapitre 4] (pertes géométrique, pertes par frottement et pertes dynamiques par chocs) a permis de concevoir un nouvel échappement doté d'un rendement théorique de 80 % appelé *échappement à double impulsion primitive*. Cette invention exploite le potentiel de l'échappement Melly Frères [2, p. 78-79] tout en fiabilisant son fonctionnement par un tracé amélioré grâce à la méthode du *tracé primitif*.

L'échappement à double impulsion primitive a été réalisé et testé à l'échelle 1 : 1 par Vaucher Manufacture Fleurier. L'ancre et sa glissière, ainsi que la roue d'échappement ont été usinées dans du silicium par gravure profonde au Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM). Le rendement mesuré sur le premier prototype est de 30 %. L'écart significatif entre les rendements théorique et mesuré s'explique en particulier par les frottements de l'ancre dans sa glissière qui sont nettement supérieurs aux valeurs escomptées. La solution envisagée pour s'approcher davantage du rendement théorique de 80 % est de recourir à un guidage flexible en translation à rigidité compensée [6] tel qu'illustré dans la Fig. 8.

Références

- [1] D. S. BERNSTEIN, « Feedback Control : An Invisible Thread in the History of Technology », *IEEE Contr. Sys. Mag.*, Vol. 22, pp. 53-68, April 2002.
- [2] Paul M. CHAMBERLAIN, *It's About Time*. The Holland Press, London, 1964.
- [3] Thierry CONUS, *Conception et optimisation multicritère des échappements libres pour montres-bracelets mécaniques*, Thèse doctorale 3806, EPFL 2007.
- [4] George DANIELS, *La Montre*, Troisième édition, Watchprint.com, 2011.
- [5] Léopold DEFOSSEZ, *Théorie Générale de l'Horlogerie*, Chambre suisse d'horlogerie, La Chaux-de-Fonds, 1950.
- [5] Charles GROS, *Echappements d'horloges et de montres*, Réédité par Watchmakers Publishing, 2013.
- [6] Simon HENEIN, *Conception des guidages flexibles*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 2001.
- [7] Olivier LÄSSER, *Analyse, synthèse et création d'échappements horlogers par la théorie des engrenages*, Thèse doctorale 6189, EPFL 2014.
- [8] Olivier LÄSSER, *Escapement Mechanism*, Brevet WO2013092316 (A1), 06 27, 2013.
- [9] TARDY (pseudonyme d'Henri-Gustave Lengelle), *La Montre, les échappements recul, le spiral, la compensation*. Paris, Chez l'auteur 1968.